



MODELAGEM NUMÉRICA DE MIGRAÇÃO DE KNICKPOINTS EM RIOS DE LEITO ROCHOSO NO NORDESTE DO BRASIL

Genisson Panta¹
Antonio Carlos de Barros Corrêa²
Pedro Val³
Kleython de Araújo Monteiro⁴

RESUMO

Em um cenário de queda do nível de base, as paisagens respondem alterando a declividade dos canais e das encostas para restabelecer condições pré-existentes. Assim, compreender as taxas de soerguimento e/ou de queda do nível de base é uma questão crucial para a resolução de problemas geomorfológicos. Diante disso, este estudo buscou investigar o padrão de distribuição e a propagação de uma onda de incisão por meio da modelagem numérica da retração de *knickpoints*. Para isso, escolheu-se um dos maiores tributários do rio São Francisco em seu baixo curso: a bacia hidrográfica do rio Capiá, no semiárido de Alagoas. Com 2.344 km², a bacia apresenta afloramentos de rochas graníticas, como leucogranitos e quartzo-sienitos. O regime de descarga da rede hidrográfica é, em sua maioria, intermitente, com picos de vazão nos meses de inverno. Foram mapeados 19 knickpoints a partir de rupturas notáveis nos perfis longitudinais. Estudos anteriores sugerem que a taxa de erosão é de aproximadamente 10 m/Ma ou menos. Com isso, definiu-se um intervalo de 0,5 Ma até 10 Ma, com passos de 0,5 Ma, para a modelagem. O modelo relaciona a velocidade de migração dos knickpoints (dx/dt) com a área de drenagem a montante (m^2) e a eficiência erosiva C (m^{1-2p}/ano). Essas variáveis são balizadas por um expoente adimensional (p), relacionado a características hidráulicas da bacia hidrográfica. Como há duas variáveis desconhecidas no modelo (C e p), utilizou-se uma otimização por força bruta para minimizar a soma dos quadrados dos resíduos a cada iteração. O melhor ajuste do modelo ocorreu em 1,5 Ma, com uma combinação de $p = 0,43$ e $C = 2,32 \times 10^{-6} [m^{0,14}/ano]$, enquanto o

¹ Doutorando em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco - PE, genisson.panta@ufpe.br;

² Professor da Universidade Federal de Pernambuco - PE, antonio.correa@ufpe.br;

³ Professor do Queens College - NY, pval@qc.cuny.edu;

⁴ Professor da Universidade Federal de Alagoas - AL, kleython.monteiro@igdema.ufal.br;



segundo melhor resultado foi obtido para 3,5 Ma. Para os dados de entrada, p e C variaram em um intervalo estreito ($p = 0,41\text{--}0,46$ e $C = 3 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$). A soma dos quadrados dos resíduos variou de $1,19 \times 10^7$ a $1,21 \times 10^7$. O erro médio entre a posição dos knickpoints mapeados e modelados foi de $0,64 \pm 0,53$ km (σ), com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,98. Para o cenário com melhor ajuste, a taxa de retração média inferida foi de 9 km/Ma, com mínimo de 3 km/Ma e máximo de 16 km/Ma. Com isso, inferimos que o estado transiente evidenciado foi desencadeado pela abertura do cânion do rio São Francisco, iniciada provavelmente durante o Plioceno.

INTRODUÇÃO

A dinâmica da evolução de paisagens em resposta a mudanças no nível de base é um tema central na Geomorfologia de Margens Passivas (Howard et al., 1994; Whipple, 2001). Geralmente, a queda do nível de base, seja por soerguimento tectônico ou por variações climáticas, desencadeia processos de incisão fluvial que se propagam a montante na forma de *knickpoints* — rupturas abruptas na declividade nos perfis longitudinais dos rios de leito rochoso (Whipple et al., 2013). A compreensão da migração desses *knickpoints* a montante e das taxas associadas a esse processo é essencial para reconstruir a história evolutiva de paisagens e entender padrões de resposta do sistema fluvial a perturbações pretéritas (Monteiro e Corrêa, 2020).

Sinais de perturbações pós-rift são ubíquos nos sistemas fluviais do Nordeste. Isso inclui evidências sugestivas de reorganização dos padrões regionais de redes de drenagem, migração de *knickpoints*, mudança na oferta do fluxo sedimentar para a plataforma continental (Monteiro e Corrêa, 2020; Alves et al., 2022). A identificação e análise desses sinais evidenciam a sensibilidade dos sistemas fluviais às mudanças no regime de base e ressaltam a necessidade de ferramentas analíticas que permitam interpretar e quantificar tais respostas. Nesse contexto, a modelagem matemática tem se mostrado uma ferramenta importante, permitindo quantificar a dinâmica de migração de *knickpoints* com base em leis físicas (Fernandes, 1996; Crosby & Whipple, 2006; Fernandes, 2016; Fernandes et al., 2022).

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo modelar numericamente a propagação da onda de incisão no rio Capiá, um dos principais tributários da região do Cânion do Rio São Francisco, em Alagoas. O rio Capiá drena uma área inserida em um



contexto semiárido e, a princípio, tectonicamente estável, mas que apresenta indícios morfológicos de resposta recente a mudanças no nível de base. Por meio da aplicação de modelos matemáticos baseados em leis de erosão de rios de leito rochoso, foi possível estimar a taxa de recuo de *knickpoints* e simular a trajetória da incisão ao longo do tempo. Os resultados obtidos contribuem para a compreensão da evolução geomorfológica do setor analisado e fornecem subsídios para discussões sobre a sensibilidade de bacias hidrográficas em ambientes semiáridos a mudanças tectônicas e climáticas. Nesse sentido, reforçamos o potencial de abordagens integradas entre dados morfométricos, análise de perfis longitudinais e modelagem quantitativa para a reconstrução da história evolutiva de sistemas fluviais em margens passivas.

METODOLOGIA

A bacia hidrográfica perfaz 2344 km², sendo um dos maiores tributários do baixo São Francisco. Seu canal principal possui 105 km e drena áreas do semiárido nordestino. Suas cabeceiras são posicionadas sobre o Planalto da Borborema e sua foz nos pedimentos da Superfície Sertaneja, onde o Capiá se encontra o São Francisco. Foi nessa última região que enfocamos nossa análise (Fig. 1). Do ponto de vista geológico, a área de estudo se localiza no Superterreno Pernambuco-Alagoas, marcado por intrusões graníticas do Ciclo Brasileiro (640 a 450 Ma) e por zonas de cisalhamento de orientação SE-NW e ENE-WSW (Hasui et al., 2012; Brito Neves e Silva Filho, 2019). Porém, nosso foco foi um pequeno recorte de 360 km² coberto por mapeamento geológico de 1:50.000 (Silva Filho et al., 1979) na confluência do vale escarpado do Capiá com o cânion do Rio São Francisco.

O primeiro passo do nosso estudo foi mapear os *knickpoints* da rede hidrográfica da bacia do Rio Capiá. Essa etapa foi executada por meio de um Modelo Digital de Elevação com resolução de 30 metros disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (TOPODATA), que são dados da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) reamostrados para fins de análise morfométrica (Valeriano e Rossetti, 2012). A partir disso, a análise dos perfis longitudinais, incluindo a reconstrução de paleoperfis a partir das rupturas, foi realizada por meio do TopoToolbox e do Topographic Analyses Tool Kit (Schwanghart e Scherler, 2014; Forte e Whipple, 2019). A extração da rede hidrográfica se deu a partir de um limiar 1 km² de área de drenagem (e. g., Montgomery e Dietrich, 1988).

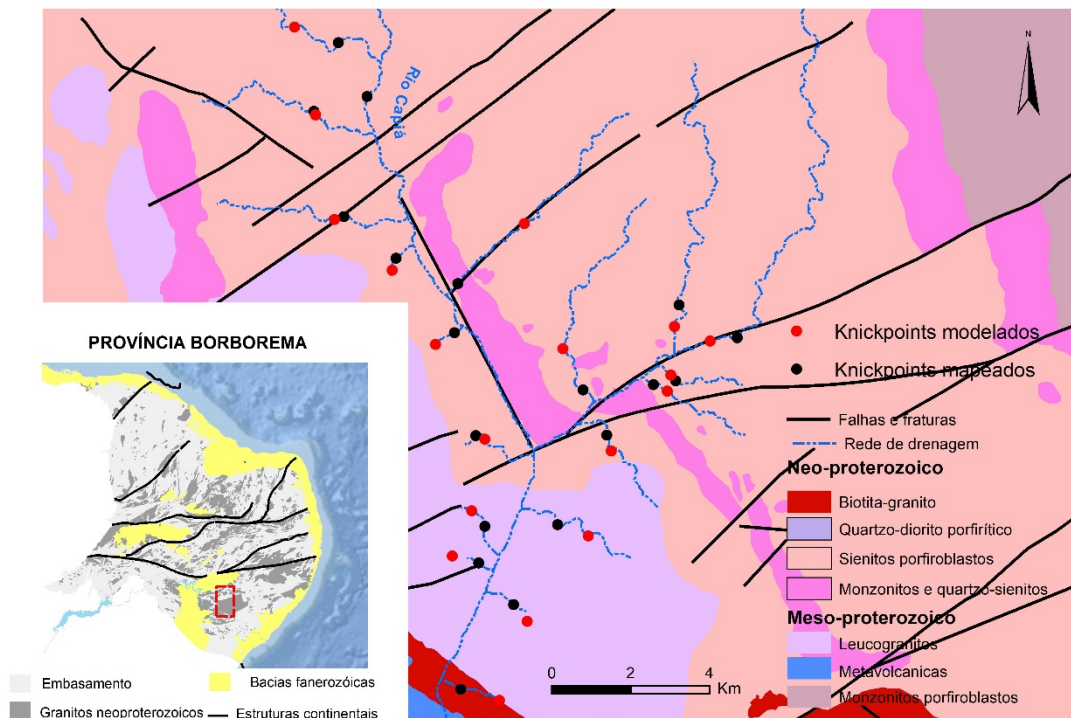


Fig. 1 – Área de estudo na bacia do Rio Capiá, região de confluência com o cânion do Rio São Francisco, em Alagoas.

Depois de mapear os knickpoints, aplicamos um modelo de celeridade de recuo de *knickpoints*. Para isso, utilizamos o pacote Transient-Profiler implementado por Jaiswara et al., (2019). O modelo não considera variações litológicas e características hidráulicas do canal (Kirby e Whipple, 2012). O modelo assume que a velocidade de migração de um knickpoint a montante (dx/dt) é controlada pela área de drenagem (A), um coeficiente de eficiência erosiva (C) e um expoente relacionado a processos hidrológicos atuantes (p), formalmente expressa como:

$$\frac{dx}{dt} = CA^p$$

Uma otimização força bruta foi utilizada para combinar os parâmetros C e p de maneira a minimizar o erro entre a posição dos knickpoints previstos e observados (Crosby e Whipple, 2006; Berlin e Anderson, 2007; Gallen et al., 2013). Como as taxas de erosão regionais são reconhecidamente baixas (i.e., <10 m/Ma, Peulvast e Bétard, 2021), nós simulamos eventos de queda do nível de base que contemplaram 10 Ma, em



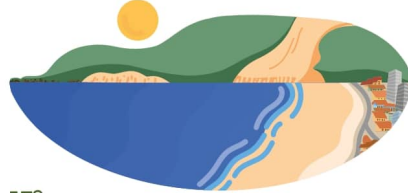
passos de 0,5 Ma. Por fim, nós analisamos quais cenários apresentaram um menor erro e pudemos estimar quais parâmetros C e p foram mais coerentes com os dados de entrada e quando no passado o episódio de queda do nível de base que formou os *knickpoints* ocorreu.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem indicam dois cenários plausíveis para a idade da queda do nível de base responsável pela incisão no rio Capiá: 1,5 Ma e 3,5 Ma (Fig. 2C). O melhor ajuste entre as posições modeladas e observadas dos *knickpoints* foi alcançado com os parâmetros $p = 0,43$ e $C = 2,32 \times 10^{-6} \text{ m}^{0,14}/\text{ano}$, os quais estão dentro de um intervalo restrito de variação (p entre 0,41–0,46 e C entre 3×10^{-6} e 7×10^{-6}). Esses valores são coerentes com estimativas regionais de taxas de erosão obtidas por outras abordagens, como medições empíricas em bacias hidrográficas adjacentes (Oliveira *et al.*, 2025), o que reforça a robustez dos parâmetros utilizados. A convergência entre os dados observados e o modelo sugere que a abordagem numérica adotada reproduz a dinâmica de propagação da onda de incisão.

A qualidade do ajuste foi avaliada pela soma dos quadrados dos resíduos, que variou entre $1,19 \times 10^7$ e $1,21 \times 10^7$ (Fig. 2C), com erro médio de $0,64 \pm 0,52 \text{ km}$ na previsão da posição dos *knickpoints*. Considerando a confluência com o cânion do rio São Francisco como ponto de partida da incisão, os resultados indicam forte correlação entre os dados previstos e observados, com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$ (Fig. 2B). Essa correlação alta indica que o modelo é capaz de capturar com precisão a posição dos *knickpoints*, mesmo com pequenas variações nos parâmetros de entrada, o que sugere que o sistema responde de maneira relativamente previsível a perturbações no nível de base.

As taxas de recuo horizontal dos *knickpoints* variam de acordo com o tempo de início assumido para a incisão. No cenário de 1,5 Ma, a taxa média de recuo foi de 9 km/Ma, com variações entre 2,7 e 16 km/Ma (Fig. 2A). Já no cenário de 3,5 Ma, a taxa média foi de 3,8 km/Ma, com valores extremos de 1,2 a 7 km/Ma. Esses resultados são coerentes com valores encontrados em estudos de margens passivas em outros setores do Atlântico Sul e sugerem que a resposta erosiva das bacias semiáridas nordestinas a mudanças no nível de base pode ocorrer em diferentes escalas temporais, com taxas de



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

recuo aceleradas em momentos de maior energia disponível no sistema, como após quedas abruptas do nível de base ou intensificação do clima.

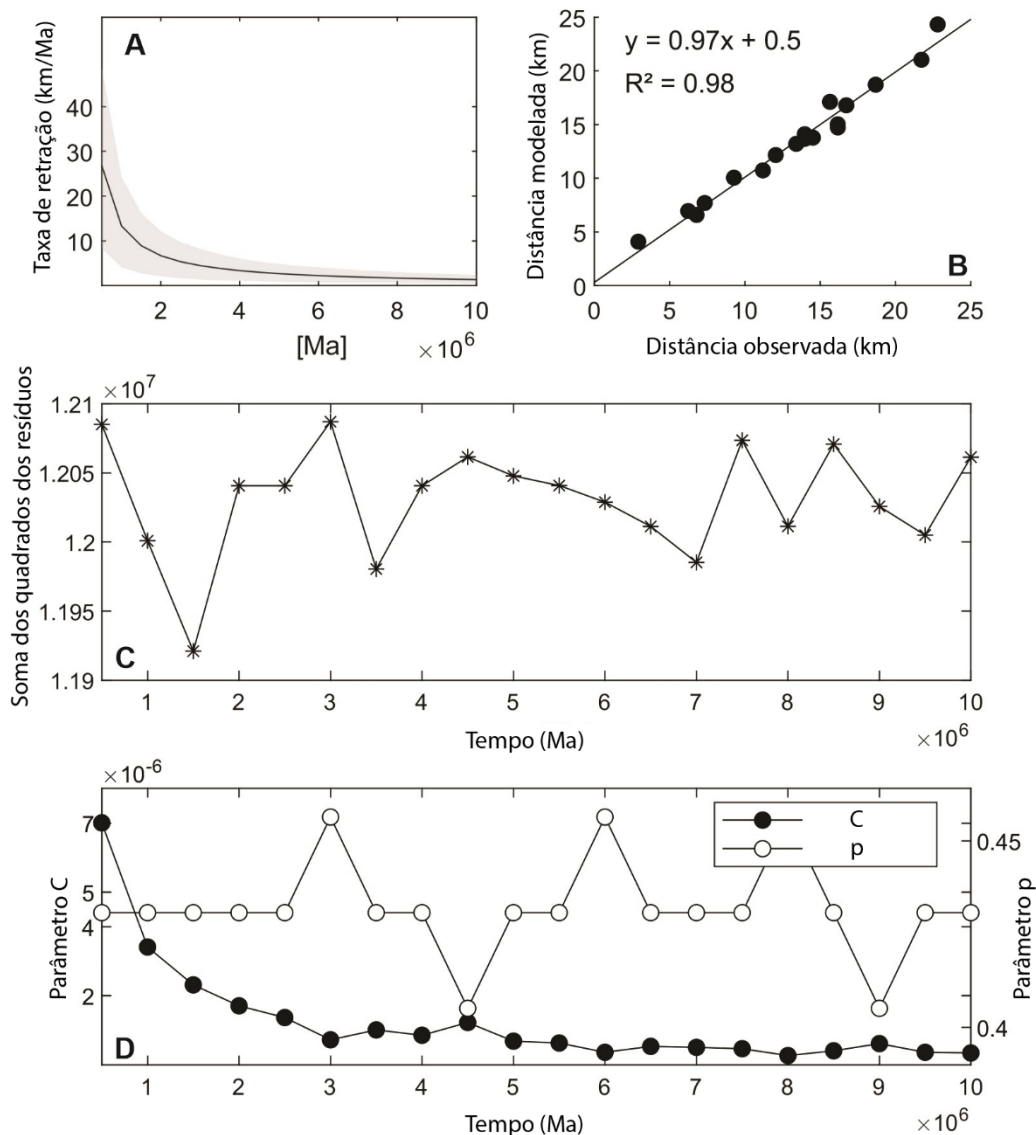


Fig. 2 – Velocidade do recuo da onda de incisão (A), comparação do desempenho do modelo (B e C) e variação dos parâmetros C e p para cada em um intervalo de 10 Ma e simulações de 0,5 Ma.

Por fim, com base na reconstrução do paleoperfil, estimou-se uma taxa máxima de erosão a jusante dos *knickpoints* de 75 m/Ma (considerando início da incisão em 1,5 Ma) e mínima de 32 m/Ma (para 3,5 Ma). Essas taxas, embora modestas em



comparação com ambientes tectonicamente ativos, são elevadas para o contexto semiárido e supostamente estável do Nordeste brasileiro. Isso indica que, mesmo em margens passivas, a reorganização do sistema fluvial e a incisão podem ser intensas, especialmente quando associadas a mudanças climáticas e à reativação de antigas estruturas tectônicas. Os resultados, portanto, reforçam a hipótese de que perturbações pós-*rift* ainda influenciam significativamente a dinâmica geomorfológica da região, com implicações diretas na exportação de sedimentos para a margem continental e na evolução de longo prazo das bacias hidrográficas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem numérica da migração de knickpoints na bacia do rio Capiá permitiu quantificar a dinâmica de resposta do sistema fluvial a perturbações no nível de base, possivelmente associadas à abertura do cânion do rio São Francisco. Os resultados apontam para dois cenários temporalmente coerentes (1,5 Ma e 3,5 Ma), ambos com bom ajuste entre dados observados e modelados. A elevada correlação estatística obtida reforça a capacidade do modelo de capturar os principais mecanismos envolvidos na propagação da incisão a montante. As taxas de recuo horizontal estimadas (até 16 km/Ma) e as taxas verticais máximas de erosão (até 75 m/Ma) destacam a sensibilidade das paisagens semiáridas nordestinas a perturbações geológicas e climáticas. Esses valores são significativos para regiões de margens passivas e sugerem que a reorganização das redes de drenagem e o ajuste morfológico podem ser mais intensos do que se supunha para o Nordeste brasileiro. A abordagem empregada, combinando morfometria fluvial e modelagem quantitativa, mostrou-se eficaz para reconstruir episódios erosivos passados e pode ser expandida para outros setores da bacia do São Francisco ou para outras margens passivas. Além disso, o intervalo estreito de parâmetros (C e p) obtido para o melhor ajuste sugere que há certa uniformidade no controle hidrológico e morfológico da migração de knickpoints na área. Portanto, reforçamos o potencial da modelagem numérica como ferramenta para investigar a evolução de paisagens.

Palavras-chave: semiárido, paisagens transientes, Rio São Francisco.



REFERÊNCIAS

- ALVES, F. C. et al. Post-rift geomorphological evolution of a passive continental margin (Paraíba region, northeastern Brazil): Insights from river profile and drainage divide analysis. **Geomorphology**, v. 414, p. 108384, 2022.
- BRITO NEVES, Benjamim Bley de; SILVA FILHO, Adejardo Francisco da. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. **Geologia USP. Série Científica**, v. 19, n. 2, p. 3-28, 2019.
- PEULVAST, Jean-Pierre; BÉTARD, François. Morphostratigraphic constraints and low temperature thermochronology: Lessons from a review of recent geological and geomorphological studies in northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, p. 103464, 2021.
- CROSBY, B. T.; WHIPPLE, K. X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, v. 82, n. 1-2, p. 16-38, 2006.
- FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: teoria, potencialidades e desafios. **Espaço Aberto**, v. 6, n. 1, p. 209-247, 2016.
- FERNANDES, N. F. Modelagem matemática em geomorfologia: potencialidades e limitações. **Sociedade e Natureza**, v. 15, p. 222-227, 1996.
- FERNANDES, N. F.; PEIFER, D.; VAL, P. Modelos numéricos de evolução do relevo (LEMS) e sua importância para estudos de evolução da paisagem. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira, Editora da UNB**, p. 957-1003, 2022.
- FORTE, Adam M.; WHIPPLE, K. X. The topographic analysis kit (TAK) for TopoToolbox. **Earth Surface Dynamics**, v. 7, n. 1, p. 87-95, 2019.
- Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., de Almeida, F. F. M. In: Bartorelli, A. (Ed.), **Geologia do Brasil**. Oficina de Textos: São Paulo, 2012.
- HOWARD, Alan D.; DIETRICH, William E.; SEIDL, Michele A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 99, n. B7, p. 13971-13986, 1994.



JAISWARA, Nilesch Kumar et al. Transient basin as indicator of tectonic expressions in bedrock landscape: Approach based on MATLAB geomorphic tool (Transient-profiler). **Geomorphology**, v. 346, p. 106853, 2019.

KIRBY, Eric; WHIPPLE, Kelin X. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of structural geology*, v. 44, p. 54-75, 2012.

MONTEIRO, K. A.; CORRÊA, A. C. B. Application of morphometric techniques for the delimitation of Borborema Highlands, northeast of Brazil, eastern escarpment from drainage knick-points. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 103, p. 102729, 2020.

MONTGOMERY, David R.; DIETRICH, William E. Where do channels begin?. **Nature**, v. 336, n. 6196, p. 232-234, 1988.

OLIVEIRA, José Guilherme et al. Relief inversion and denudation dynamics in a semi-arid landscape (Araripe Plateau, NE Brazil): Insights from cosmogenic nuclides and geomorphic surfaces. **Evolving Earth**, v. 3, p. 100064, 2025.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. TopoToolbox 2–MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2014.

SILVA FILHO, M.A. da, BOMFIM, L.F.C., SANTOS, R.A. dos, LEAL, R.A., BRAZ FILHO, P.A. de, RODRIGUES, T.L. das N., SANTOS, J.C. dos, BRUNI, D.C. **Projeto Complexo Canindé do São Francisco**: relatório final. CPRM: Salvador, 1979

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012.

WHIPPLE, Kelin X. Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation?. **American Journal of Science**, v. 301, n. 4-5, p. 313-325, 2001.

WHIPPLE, Kelin; DIBIASE, Roman A.; CROSBY, B. T. Bedrock rivers. In: **Fluvial geomorphology**. Elsevier Inc., 2013. p. 550-573.